

Phosphor- und Kaliumbedarf einer rotschwingelreichen Mähwiese im Jura

Bernard Jeangros und Sokrat Sinaj

Agroscope, 1260 Nyon, Schweiz

Auskünfte: Bernard Jeangros, E-Mail: bernard.jeangros@agroscope.admin.ch



Der Vergleich von verschiedenen Phosphor- und Kalium-Düngungsverfahren auf einer Weide im Jura stösst bei zahlreichen Besuchern auf Interesse.

Einleitung

Die Düngung von Dauerwiesen muss auf eine Strategie ausgerichtet sein, welche die langfristige Erhaltung einer ausgeglichenen botanischen Zusammensetzung und einen stabilen Futterertrag zum Ziel hat, ohne dass dabei die Umwelt beeinträchtigt wird (Huguenin-Elie *et al.* 2017). Die Düngung intensiver Wiesen im Mittelland war bereits Gegenstand zahlreicher Studien. Weniger gut erforscht ist der Nährstoffbedarf von wenig intensiv bewirtschafteten Bergwiesen. Zu dieser Kategorie gehören Wiesen, die reich an Rotschwengel und an Rotem Straussgras sind und die in den Bergregionen und insbesondere im Jura weit verbreitet sind. Sie liefern einen Teil der Futtervorräte für den Winter und sie spielen auch eine wichtige Rolle bei der Erhaltung der Biodiversität, wenn sie artenreich sind. Diese Funktion darf nicht durch eine zu starke Düngung gefährdet werden. Hauptziel des 1992 im Jura eingerichteten Versuchs war es, die langfristigen Wirkungen verschiedener Düngergaben von Phosphor (P) und Kalium (K) auf die Verfügbarkeit dieser Elemente im Boden, auf die botanische

Zusammensetzung der Wiese sowie auf die Menge und den P- beziehungsweise K-Gehalt des produzierten Futters zu untersuchen. Ein Teil der Ergebnisse dieses Versuchs wurde bereits in Studien gezeigt, bei denen ein Indikator für die Optimierung der P-Düngung von Wiesen gesucht wurde (Jouany *et al.* 2013; Liebisch *et al.* 2013; Messiga *et al.* 2015). Dieser Artikel soll einen Überblick über alle Ergebnisse geben, die im Übrigen bereits in die Aktualisierung der Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (Richner und Sinaj 2017) eingeflossen sind. Der Artikel legt die P- und K-Düngermengen fest, die bei diesem Wiesentyp ausgebracht werden sollten, um die gewünschte botanische Zusammensetzung zu erhalten und eine an die Bedingungen angepasste Futterproduktion zu gewährleisten, ohne die Umwelt zu beeinträchtigen.

Material und Methoden

Versuchsstandort

Der Versuch wurde von 1992 bis 2006 im Jura auf der Alp La Petite Ronde in der Gemeinde Les Verrières (NE, 1100 m) durchgeführt, auf einer Fläche, die zuvor meist beweidet aber manchmal auch gemäht worden war. Mit den beiden dominierenden Arten Rotschwengel (*Festuca rubra*) und Rotes Straussgras (*Agrostis capillaris*) ist die Pflanzengesellschaft dieser Wiese der Assoziation *Festuco-Agrostietum* zuzuordnen. Der Boden ist eine saure (pH 5,5) und humusreiche (7 % organische Substanz) Braunerde mit einer tonig-lehmigen Textur (Ton 29 %, Lehm 47 %, Sand 24 %). Flisch *et al.* (2017) beurteilten den Nährstoffzustand des Bodens in 1991 als mässig für P (0,59 mg/kg, CO₂-Methode) und K (11,5 mg/kg, CO₂-Methode) und genügend für Mg (95 mg/kg, CaCl₂-Methode).

Gemäss Schreiber (1977) ist das Klima auf der Alp La Petite Ronde rau. In den drei Jahren mit detaillierter Messung der Futterproduktion (1997, 2001 und 2005) lag die Durchschnittstemperatur während der Vegetationsperiode nahe am mehrjährigen Durchschnitt (12,6 °C von Mai

bis September). Bezüglich der Niederschläge waren die Jahre 1997 und 2001 etwas feuchter (+35 bzw. +68 mm) und das Jahr 2005 trockener (–148 mm) als der mehrjährige Durchschnitt (761 mm von Mai bis September).

Versuchsanordnung

Der vollständige Versuch war als Split-Plot mit vier Wiederholungen (Teilflächen 10 m × 3 m) angelegt, mit drei Nutzungsarten (Hauptverfahren) und acht PK-Düngungsverfahren (Unterverfahren, Tab. 1). In diesem Artikel wurde nur die Nutzungsart mit zwei Schnitten pro Jahr (was einer wenig intensiven Bewirtschaftungsintensität entspricht) berücksichtigt. Der erste Schnitt erfolgte Anfang Juli im Stadium Ende Rispschieben – Anfang Blüte des Knautgrases und der zweite Schnitt Mitte September (10 Wochen Aufwuchs). Die anderen Nutzungsarten (vier Beweidungen pro Jahr und vier Schnitte pro Jahr) werden in einem zweiten Artikel behandelt.

Die P-Düngung erfolgte mit Granuphos 18 % (Landor), die K-Düngung in Form von Kaliumsalz (60 %). Mit der zusätzlichen Gabe von Magnesium (Granomag, Landor) und Calcium-Granulat (CaO) wurde eine einheitliche Versorgung mit Magnesium (Mg) und Calcium (Ca) bei allen Düngungsverfahren sichergestellt (Tab. 1). Alle diese Dünger wurden gleichzeitig zwischen Ende April und Anfang Mai (bzw. Ende Juli im Jahr 2001) mit Hilfe einer Sämaschine vom Typ Oyord (Plotman Wintersteiger, Österreich) ausgebracht, um eine homogene Verteilung sicherzustellen. Jedes Jahr wurden nach dem ersten Schnitt 25 kg Stickstoff/ha (Ammoniumnitrat) ausgebracht. Schäden durch Wühlmäuse, insbesondere *Arvicola terrestris*, wurden durch eine regelmässige Bekämpfung mit Rodentiziden begrenzt.

Beobachtungen und Messungen

Die Bodeneigenschaften wurden mit Bodenproben aus rund fünfzehn Entnahmen pro Parzelle in einer Tiefe von 0 bis 10 cm bestimmt. Die Stichproben wurden in den Jahren 1991 (vor der Einrichtung des Versuchs) und 2005 entnommen, jeweils Anfang Oktober nach dem letzten Schnitt. Der Gehalt des Bodens an P, K und Mg wurde mit den beiden in der Schweiz empfohlenen Extraktionsmethoden gemessen: Extraktion mit CO₂-gesättigtem Wasser und Ammoniumacetat-EDTA (AA-EDTA) für P und K, Extraktion mit einer CaCl₂-Lösung und AA-EDTA für Mg. Der Ca-Gehalt wurde ebenfalls nach der Extraktion mit AA-EDTA bestimmt. Alle diese Methoden wurden von Flisch *et al.* (2017) beschrieben. Die botanische Zusammensetzung wurde bei jeder Parzelle zu Beginn des Versuchs (1992) und 2006 gemäss der

Zusammenfassung

Die ausgewogene Düngung einer Wiese mit Phosphor (P) und Kalium (K) zielt auf die Erhaltung einer geeigneten botanischen Zusammensetzung und einer ausreichenden Futterproduktion ohne die Umwelt zu beeinträchtigen. Acht verschiedene P- und K-Düngungsverfahren wurden während 13 Jahren auf einer wenig intensiv bewirtschafteten Dauerwiese im Jura ausgebracht. Durch zunehmende Düngung mit P (zwischen 0 und 26 kg P/ha/Jahr) und K (zwischen 0 und 116 kg K/ha/Jahr) konnte die Verfügbarkeit dieser Elemente im Boden verbessert werden. Die PK-Düngung hatte wenig Einfluss auf die botanische Zusammensetzung, aber eine signifikante und positive Wirkung auf die produzierte Futtermenge ab dem zehnten Jahr. Der Gehalt an P und K im Futter stieg mit zunehmender Düngung deutlich an. Ausgehend vom P-Gehalt des Bodens, von der botanischen Zusammensetzung, der Menge und des P-Gehalts des produzierten Futters, der Bilanz der P-Einfuhr und -Ausfuhr sowie vom P-Ernährungsindex kann eine Düngung mit 9 bis 17 kg P/ha/Jahr für diese Art von Wiese mit einer Produktion von etwa 45 dt TS/ha/Jahr als ideal betrachtet werden. Die optimale K-Dosis ist schwieriger abzuschätzen, weil sie je nach berücksichtigtem Indikator stark schwankt.

von Daget & Poissonet (1971) beschriebenen Methode festgestellt (50 Punkte pro Parzelle). Die Erhebungen erfolgten in der zweiten Maihälfte im Stadium Schossen des Knautgrases.

Die Menge des produzierten Futters und dessen Nährstoffgehalt wurden in den Jahren 1997, 2001 und 2005 für jede Parzelle bei jedem Schnitt bestimmt. Dazu wurde ein 1,5 m breiter und 6,8 m langer Streifen mit einem Balkenmäher geschnitten (Schnitthöhe 5 bis 7 cm). Das Grünfutter wurde vor Ort gewogen und es wurden Proben zu etwa 0,5 kg entnommen, um des Gehalt an Trockensubstanz (TS), P, K, N und Mg zu messen.

Datenanalyse

Der jährliche Nährstoffgehalt errechnete sich aus dem Durchschnitt des Gehalts der einzelnen Schnitte gewichtet nach dem Ertrag an TS. Die jährlich mit dem Futter exportierten P- und K-Mengen wurden durch Multipli-

Tab. 1 | Jährliche Gabe von Nährstoffen in den acht Düngungsverfahren.

Düngungsverfahren	P (kg/ha/Jahr)	K (kg/ha/Jahr)	N (kg/ha/Jahr)	Mg (kg/ha/Jahr)	Ca (kg/ha/Jahr)
0/0	0	0	25	18	80
9/0	9	0	25	18	80
9/29	9	29	25	18	80
9/58	9	58	25	18	80
17/29	17	29	25	18	80
17/58	17	58	25	18	80
17/87	17	87	25	18	80
26/116	26	116	25	18	80

kation des P- beziehungsweise K-Gehalts der einzelnen Schnitte mit dem entsprechenden Ertrag an TS und anschließender Addition beider Schnitte errechnet.

Der Phosphor- und Kalium-Ernährungsindex (PNI bzw. KNI) wurde für jeden Schnitt nach Duru und Théliér-Huché (1997) berechnet. Der jährliche Index ergab sich durch Gewichtung des Indexes für jeden Schnitt mit dessen Ertrag. Die Zufuhr an Nährstoffen wird als ausreichend beurteilt, wenn der Index zwischen 80 und 120 liegt. Ein Index unter 80 entspricht einer Mangelversorgung, ein Index über 120 gilt als «Luxuskonsum».

Zu jeder gemessenen Variablen wurde getrennt für jedes Beobachtungsjahr eine einfaktorielle Varianzanalyse (Einflussvariable = PK-Düngung) durchgeführt. Wenn der Einfluss der Düngung statistisch signifikant war, wurden die Durchschnitte pro Düngungsverfahren paarweise nach der Methode der kleinsten gesicherten Differenz (Least Significant Difference, LSD) verglichen. Alle statistischen Analysen wurden mit der Software R 3.3.3 (R Core Team 2017) durchgeführt.

Resultate und Diskussion

Gehalt des Bodens an Mengenelementen

Im Jahr 2005, dreizehn Jahre nach Versuchsbeginn, konnten unabhängig von der angewendeten Extraktionsmethode je nach P- und K-Düngung deutliche Unterschiede bezüglich des P- und K- Gehalts des Bodens festgestellt werden (Tab. 2). Der Gehalt an $P_{AA-EDTA}$ reagierte am empfindlichsten auf die PK-Düngung, wobei beim Düngungsverfahren 26/116 ein acht Mal höherer Wert als beim Düngungsverfahren 0/0 erreicht wurde. Durch eine jährliche Zuführung von 9 kg P/ha wurde ein mässiger Nährstoffzustand des Bodens beibehalten, mit 17 kg P/ha wurde ein genügendes Niveau erreicht (Flich et al. 2017). Trotz ziemlich grosser Schwankungen des K-Gehalts im Boden je nach angewendeter PK-Düngung konnte die Bodenfruchtbarkeit bezüglich K im Jahr 2005 fast aller Düngungsverfahren bei beiden Extraktionsmethoden als genügend bezeichnet werden, selbst wenn keine K-Düngung erfolgte (Flich et al. 2017).

Der pH-Wert und der Ca-Gehalt des Bodens sanken mit zunehmender PK-Düngung leicht. Die Unterschiede des Mg-Gehalts des Bodens waren dagegen nicht signifikant. Die Abnahme des Ca-Gehalts lässt sich durch die höheren Ca-Ausfuhren in den Düngungsverfahren mit der grösseren produzierten Futtermenge aufgrund der höheren Düngung erklären (siehe weiter unten). Die Abnahme des pH-Werts bei zunehmender PK-Düngung ist vermutlich auf den sinkenden Ca-Gehalt des Bodens sowie auf die saure Wirkung der ausgebrachten Dünger zurückzuführen.

Tab. 2 | Auswirkung von 13 Jahren PK-Düngung auf den Gehalt des Bodens an P, K, Mg und Ca sowie auf den pH des Bodens einer zwei Mal jährlich gemähten Wiese im Jura (2005, Horizont 0–10 cm). Für eine bestimmte Eigenschaft unterscheiden sich Werte mit einem gleichen nachfolgenden Buchstaben nicht signifikant voneinander.

Bodeneigenschaften	$P_{AA-EDTA}$ mg/kg	P_{CO_2} mg/kg	$K_{AA-EDTA}$ mg/kg	K_{CO_2} mg/kg	$Mg_{AA-EDTA}$ mg/kg	Mg_{CaCl_2} mg/kg	$Ca_{AA-EDTA}$ mg/kg	pH
Anfangswert (1991)	–	0,59	–	11,5	–	95	–	5,51
P/K-Düngung								
0/0	7,6 e	0,44 c	127 d	12,7 c	174 a	134 a	2328 b	5,55 ab
9/0	24,5 cde	0,61 abc	135 cd	14,3 c	181 a	137 a	2826 a	5,73 ab
9/29	18,5 cde	0,57 abc	145 cd	15,4 c	164 a	129 a	2460 abc	5,50 b
9/58	15,4 de	0,49 bc	159 c	16,0 c	162 a	128 a	2157 bc	5,48 b
17/29	37,1 bcd	0,69 ab	152 cd	15,4 c	175 a	136 a	2206 bc	5,43 bc
17/58	40,6 abc	0,62 abc	140 cd	12,5 c	170 a	124 a	2412 c	5,60 ab
17/87	53,2 ab	0,77 a	198 b	21,0 b	163 a	131 a	2144 bc	5,28 c
26/116	61,0 a	0,73 a	238 a	25,5 a	151 a	123 a	1923 c	5,28 c
Durchschnitt	32,2	0,62	162	16,6	167	130	2307	5,48
P-Wert	0,001	0,032	0,000	0,000	0,159	0,389	0,005	0,001
LSD	22,8	0,20	27	4,5	–	–	390	0,19

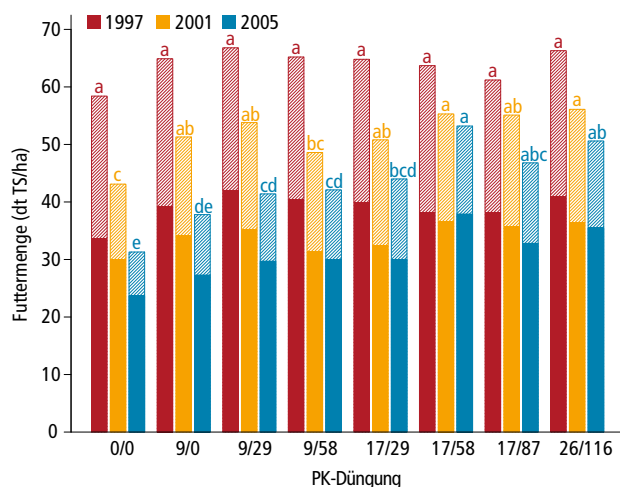


Abb. 1 | Einfluss der PK-Düngung auf die Menge des produzierten Futters (dt TS/ha) einer zwei Mal jährlich gemähten Wiese im Jura in den Jahren 1997, 2001 und 2005. Die gefüllten Balkenflächen entsprechen den Futtermengen des ersten, die schraffierten Balkenflächen den Mengen des zweiten Schnitts. Zwei gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Jahresmengen (Summe der Menge aus beiden Schnitten) im betreffenden Jahr nicht signifikant unterschieden.

Botanische Zusammensetzung der Wiese

2005 wurden in allen Teilflächen mit zwei Schnitten zusammen 57 Arten gezählt. Dreizehn Arten sind im Schlüssel zur Bestimmung des biologischen Potenzials von wenig intensiv genutzten Wiesen für die Alpenordseite aufgeführt (BLW 2014), wobei das Ruchgras (*Anthoxanthum odoratum*), die Platterbse (*Lathyrus pratensis*), der Weiche Pippau (*Crepis mollis*), das Öhrchen-Habichtskraut (*Hieracium lactucella*) und die Gemeine Margerite (*Leucanthemum vulgare*) am stärksten vertreten waren. Jede Teilfläche (30 m²) beherbergte im Durchschnitt 23,5 Arten, von denen nur 3,4 Arten Indikatoren für die biologische Qualität sind. Diese beiden Zahlen wurden nicht signifikant von der PK-Düngung beeinflusst. Ebenfalls nicht verändert wurden durch die vierzehn Jahre PK-Düngung der Anteil der Gräser, der Leguminosen, der Kräuter und der wichtigsten Arten (Tab. 3). Nur drei Arten haben signifikant auf die PK-Düngung reagiert: Der Anteil von Gamander-Ehrenpreis (*Veronica chamaedrys*) verringerte sich mit zunehmender PK-Düngung, während der Anteil von Weissklee (*Trifolium repens*) leicht anstieg. Schwieriger war die Reaktion von Goldhafer (*Trisetum flavescens*) auf die PK-Düngung einzuordnen. Der Anteil dieser Art unterschied sich nur in einem Düngungsverfahren (9/29) deutlich.

Ein schwacher Einfluss der P-Düngung auf Leguminosen wurde auch von Philipp *et al.* (2004) festgestellt, der aber im Widerspruch zu den Beobachtungen anderer Autoren steht, die einen positiven Einfluss der PK-Düngung feststellten (Thomet und Koch 1993). Im vorliegen-

den Versuch wurde die Entwicklung der Leguminosen wahrscheinlich durch andere ungünstige Faktoren begrenzt, wie beispielsweise das raue Klima.

Futtermenge

Die Menge des jährlich produzierten Futters ging von 1997 bis 2005 ständig zurück (Abb. 1). Dieser Rückgang zeigte sich auch bei den jedes Jahr durchgeführten Messungen beim ersten Schnitt, der jeweils etwa zwei Drittel des Jahresertrags an TS lieferte (Daten nicht dargestellt). Abgesehen von den starken jährlichen Schwankungen nahm die Futtermenge beim ersten Schnitt über den Zeitraum von 1993 bis 2005 jährlich um durchschnittlich 1,2 dt TS/ha ab. Der im Vergleich zu 1997 und 2001 tiefere Ertrag von 2005 lässt sich teilweise auch mit den geringeren Niederschlägen dieses Jahres verglichen mit dem mehrjährigen Mittel erklären. Der durchschnittliche Ertrag von 2005 (43 dt TS/ha) entspricht im Übrigen ziemlich genau dem Referenzertrag, der von Huguenin-Elie *et al.* (2017) für eine wenig intensiv genutzte Wiese in 1100 m Höhe angegebene wurde (45 dt MS/ha). Die PK-Düngung hatte einen signifikanten positiven Einfluss auf die Menge des produzierten Futters in den Jahren 2001 und 2005, nicht aber im Jahr 1997. Der Unterschied zwischen den Düngungsverfahren 0/0 und

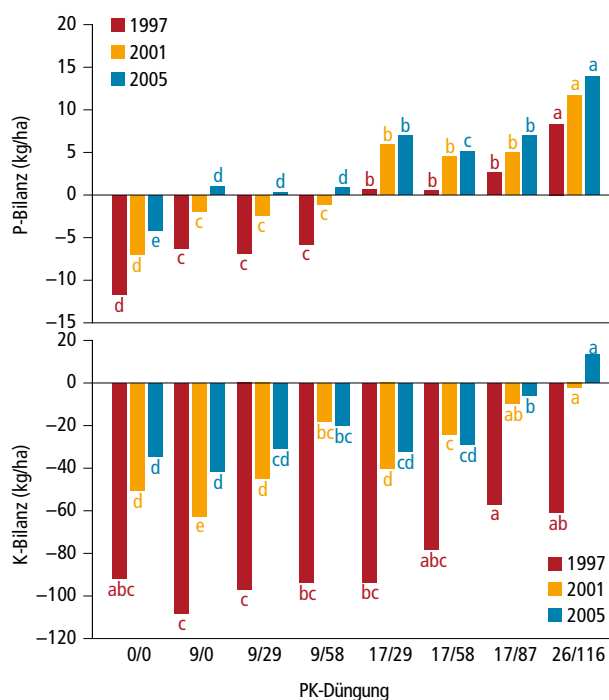


Abb. 2 | Einfluss der PK-Düngung auf die P- bzw. K-Bilanz (Einfuhr – Ausfuhr, kg/ha) einer zwei Mal jährlich gemähten Wiese im Jura in den Jahren 1997, 2001 und 2005. Zwei gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Bilanzen im betreffenden Jahr nicht signifikant unterschieden.

Tab. 3 | Auswirkung von 13 Jahren PK-Düngung auf die botanische Zusammensetzung (spezifische Anteile in %) einer zwei Mal jährlich gemähten Wiese im Jura (2006). Zwei gleiche Buchstaben bedeuten, dass sich die Werte der betreffenden Gruppe oder Art nicht signifikant unterscheiden. Es sind nur Arten aufgeführt, deren durchschnittlicher Anteil über 2% liegt.

Botanische Gruppen und wichtigste Arten	Anfangswert (1992)	P/K-Düngung								Durchschnitt	P-Wert	LSD	
		0/0	9/0	9/29	9/58	17/29	17/58	17/87	26/116				
Gräser (G)	%	60,4	52,7 a	55,9 a	58,4 a	56,8 a	56,3 a	59,4 a	59,2 a	58,9 a	57,2	0,446	–
Leguminosen (L)	%	8,8	6,4 a	3,4 a	6,5 a	4,9 a	7,7 a	7,2 a	5,2 a	4,8 a	5,8	0,124	–
Kräuter (K)	%	30,8	39,8 a	40,4 a	34,6 a	35,9 a	35,1 a	32,5 a	34,2 a	34,8 a	35,9	0,335	–
<i>Festuca rubra</i> (G)	%	18,3	27,9 a	30,3 a	29,5 a	30,8 a	28,6 a	30,7 a	30,5 a	30,7 a	29,9	0,453	–
<i>Agrostis capillaris</i> (G)	%	18,9	14,0 a	14,0 a	12,3 a	9,9 a	12,4 a	11,8 a	12,7 a	14,3 a	12,7	0,661	–
<i>Rumex acetosa</i> (K)	%	0,7	4,2 a	6,3 a	4,3 a	4,9 a	5,3 a	5,1 a	4,0 a	7,9 a	5,2	0,270	–
<i>Anthoxanthum odoratum</i> (G)	%	1,2	3,8 a	3,6 a	4,7 a	5,0 a	5,3 a	4,9 a	5,5 a	4,8 a	4,7	0,875	–
<i>Dactylis glomerata</i> (G)	%	9,6	3,2 a	4,2 a	4,1 a	5,3 a	4,8 a	5,3 a	5,7 a	4,4 a	4,6	0,679	–
<i>Ranunculus acris friesianus</i> (K)	%	3,4	4,6 a	5,6 a	3,5 a	5,8 a	5,6 a	2,6 a	4,3 a	4,5 a	4,5	0,498	–
<i>Veronica chamaedrys</i> (K)	%	2,8	5,8 ab	7,7 a	4,7 bc	3,0 bc	4,1 bc	2,5 c	3,2 bc	2,1 c	4,1	0,010	2,9
<i>Crocus albiflorus</i> (K)	%	3,3	4,8 a	3,8 a	3,9 a	3,5 a	4,1 a	3,5 a	5,0 a	4,4 a	4,1	0,859	–
<i>Veronica serpyllifolia</i> (K)	%	0,7	2,2 a	2,1 a	3,4 a	2,7 a	5,4 a	3,7 a	2,3 a	2,4 a	3,0	0,086	–
<i>Trisetum flavescens</i> (G)	%	1,2	2,0 b	2,3 b	5,4 a	2,4 b	2,1 b	3,0 b	1,7 b	2,9 b	2,7	0,037	2,1
<i>Lathyrus pratensis</i> (L)	%	2,1	2,4 a	2,7 a	3,3 a	2,4 a	3,2 a	3,5 a	2,0 a	1,6 a	2,6	0,477	–
<i>Cardamine pratensis</i> (K)	%	0,1	2,6 a	4,2 a	1,8 a	2,1 a	2,0 a	2,9 a	3,0 a	2,3 a	2,6	0,769	–
<i>Trifolium repens</i> (L)	%	4,9	1,1 cd	0,4 d	1,2 bcd	1,8 bcd	4,1 a	3,0 abc	2,3 abc	3,0 ab	2,1	0,011	1,9
<i>Ajuga reptans</i> (K)	%	0,3	3,3 a	2,7 a	1,9 a	2,6 a	1,2 a	2,2 a	1,5 a	1,4 a	2,1	0,323	–

26/116 stieg zwischen 1997 und 2005 deutlich von +14% in 1997, über +30% in 2001 auf +62% in 2005. Dieser Unterschied war beim zweiten Schnitt tendenziell etwas stärker ausgeprägt als beim ersten Schnitt.

Gehalt des Futters an Mengenelementen

2005 nahmen der P- und K-Gehalt des Futters mit zunehmender PK-Düngung bei beiden Schnitten erheblich zu (Tab. 4). Im Jahresdurchschnitt erreichten P- und K-Gehalte des Düngungsverfahrens 26/116 beinahe den doppelten Wert (+82%) im Vergleich zum Düngungsverfahren 0/0. Der P-Gehalt des ersten Schnittes war tiefer als beim zweiten Schnitt. Im Gegensatz zu den Beobachtungen von Schlegel *et al.* (2016) war der K-Gehalt des Futters dagegen unabhängig davon, ob es sich um den ersten oder zweiten Schnitt handelte.

Im Allgemeinen lagen die in diesem Versuch beobachteten P-Gehalte unter dem jeweiligen Referenzgehalt gemäss Daccord *et al.* (2017) für eine Wiese mit ausgewogenem Mischbestand (botanischer Typ A) und einem ersten Schnitt im Stadium Ende Rispschieben – Anfang Blüte des Knautgrases (Stadium 5–6: 2,7 g/kg TS) und einem zweiten Schnitt zehn Wochen später (Stadium 5: 3,2 g/kg TS).

Der K-Gehalt beim ersten Schnitt in den Düngungsverfahren mit einer Gabe von 0 beziehungsweise 29 kg K/ha lag deutlich unter dem Referenzgehalt gemäss Daccord *et al.* (2017) für eine Wiese mit ausgewogenem Mischbestand im Stadium 5–6 (21 g/kg TS). Bei einer Gabe von mindestens 58 kg K/ha näherten sich die gemessenen

Werte diesem Referenzwert. Der K-Gehalt des zweiten Schnitts lag dagegen deutlich unter dem Referenzwert für einen Aufwuchs von zehn Wochen (25 g/kg TS).

Bei den Elementen P und K lässt sich eine positive Korrelation zwischen dem Gehalt des Bodens und dem Gehalt des Futters feststellen: Für P ist der Korrelationskoeffizient etwas höher ($r=0,67$ bei der CO_2 -Extraktion respektive $r=0,74$ bei der AA-EDTA-Methode) als für K ($r=0,56$ bzw. $0,73$). In der Tat steigt der P-Gehalt des Futters ab einem P_{CO_2} -Gehalt des Bodens $0,62 \text{ mg/kg}$ oder einem $\text{P}_{\text{AA-EDTA}}$ -Gehalt des Bodens von etwa 30 mg/kg kaum mehr. Auch der K-Gehalt des Futters blieb ab einem K_{CO_2} -Gehalt des Bodens von 17 mg/kg oder einem $\text{K}_{\text{AA-EDTA}}$ -Gehalt des Bodens von etwa 170 mg/kg ziemlich stabil.

Der N-Gehalt des Futters reagierte nicht signifikant auf die PK-Düngung (Tab. 4). Dagegen verringerten sich sowohl der Mg- als auch der Ca-Gehalt mit zunehmender PK-Düngung. Dies lässt sich mit dem Anstieg der Ausfuhr von Mg und Ca in den am stärksten gedüngten Düngungsverfahren erklären, und im Falle von Mg auch durch den starken Antagonismus zwischen K und Mg. Die K-Gabe erklärt die Schwankungen des Mg-Gehalts des Futters fast vollständig ($r^2=0,96$).

Der in diesem Versuch beobachtete Mg-Gehalt des Futters war jeweils deutlich höher als der betreffende Referenzwert nach Daccord *et al.* (2017) beim ersten Schnitt (Typ A, Stadium 5–6: $1,3 \text{ g/kg TS}$) und für den zweiten Aufwuchs (Typ A, 10 Wochen: $1,9 \text{ g/kg TS}$).

Tab. 4 | Auswirkung von 13 Jahren PK-Düngung auf den Gehalt an verschiedenen Mengenelementen des Futters, das durch eine zwei Mal jährlich gemähte Wiese im Jura produziert wurde (2005). Für ein bestimmtes Element unterscheiden sich Werte mit einem gleichen nachfolgenden Buchstaben nicht signifikant voneinander.

Mengen- element	P g/kg TS			K g/kg TS			N g/kg TS			Mg g/kg TS		
	1	2	1&2*	1	2	1&2*	1	2	1&2*	1	2	1&2*
Schnitt Nr.												
P/K-Düngung												
0/0	1,26 d	1,54 e	1,33 e	11,4 e	10,4 e	11,1 e	15,5 a	20,2 a	16,6 a	2,54 a	2,89 b	2,63 ab
9/0	1,94 b	2,25 cd	2,03 c	11,2 e	10,7 e	11,1 e	16,0 a	20,4 a	17,2 a	2,51 ab	3,26 a	2,72 a
9/29	1,93 bc	2,26 cd	2,02 cd	15,1 d	13,2 d	14,5 d	16,3 a	20,3 a	17,4 a	2,41 ab	2,85 bc	2,53 ab
9/58	1,78 c	2,08 d	1,87 d	19,4 b	16,5 bc	18,5 b	15,5 a	20,1 a	16,8 a	1,97 de	2,49 d	2,12 d
17/29	2,23 a	2,72 ab	2,38 ab	14,3 d	13,4 d	13,9 d	16,0 a	20,5 a	17,5 a	2,26 bc	2,83 bc	2,45 bc
17/58	2,15 a	2,75 ab	2,32 ab	16,8 c	15,7 c	16,4 c	16,5 a	20,7 a	17,7 a	2,12 cd	2,55 cd	2,24 cd
17/87	2,15 a	2,50 bc	2,25 b	20,7 ab	17,9 ab	19,8 a	15,7 a	19,6 a	16,8 a	1,73 ef	2,12 e	1,85 e
26/116	2,24 a	2,84 a	2,41 a	21,1 a	18,4 a	20,3 a	15,8 a	19,4 a	16,8 a	1,63 f	2,15 e	1,79 e
Durchschnitt	1,96	2,37	2,08	16,2	14,5	15,7	15,9	20,1	17,1	2,15	2,64	2,29
P-Wert	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,800	0,358	0,315	0,000	0,000	0,000
LSD	0,16	0,27	0,16	1,6	1,6	1,3	–	–	–	0,27	0,30	0,25

* Gewichtet mit dem Trockensubstanz-Ertrag der einzelnen Schnitte.

P- und K-Bilanz

Wegen der gleichzeitigen Wirkung auf die produzierte Futtermenge und den Nährstoffgehalt des Futters verursachte eine Zunahme der PK-Düngung in jedem Jahr eine deutliche Erhöhung der P- und K-Ausfuhr. Im Jahr 2005 waren diese Ausfuhr im Düngungsverfahren 26/116 drei Mal höher als im Düngungsverfahren 0/0, sowohl für P (12 bzw. 4 kg P/ha/Jahr) als auch für K (103 bzw. 35 kg K/ha/Jahr).

2001 und 2005 glich die Gabe von 9 kg P/ha die P-Ausfuhr über das Futter aus (Abb. 2). Ein P-Bilanzüberschuss ergab sich bei einer Gabe von 17 oder 26 kg P/ha. Die K-Bilanz fiel 1997 bei allen Düngungsverfahren negativ aus (Abb. 2). Dieses Defizit verringerte sich 2001 und 2005 deutlich und mit einer Gabe von 87 kg K/ha ergab sich eine mehr oder weniger ausgeglichene Bilanz.

Mit der Einfuhr/Ausfuhr-Bilanz lässt sich die Entwicklung des $P_{AA-EDTA}$ -Gehalts des Bodens teilweise erklären. Tatsächlich geht dieser Gehalt leicht zurück, wenn die Bilanz negativ ist, steigt leicht an, wenn die Bilanz mehr oder weniger ausgeglichen ist, und steigt beträchtlich bei einem Bilanzüberschuss. Dieser Zusammenhang ist für den P_{CO_2} -Gehalt des Bodens weniger ausgeprägt und besteht beim K_{CO_2} - und beim $K_{AA-EDTA}$ -Gehalt des Bodens gar nicht. Der K-Gehalt des Bodens geht bei keinem Düngungsverfahren zurück, selbst wenn die K-Bilanz Jahr für Jahr negativ ausfällt.

Ernährungsindizes

Eine stärkere PK-Düngung führt zu deutlich höheren P- und K-Ernährungsindizes (PNI bzw. KNI) (Tab. 5). 1997 und 2001 lag der PNI oft über einem Wert von 80, was

auf eine ausreichende Versorgung mit P hindeutet. 2005 hatten nur die Düngungsverfahren mit mindestens 17 kg P/ha/Jahr einen Index-Wert von über 80. Der KNI lag oft unter 80, was auf eine K-Mangelversorgung deutet. 2005 war eine Gabe von mindestens 87 kg K/ha/Jahr erforderlich, damit ein KNI von über 80 erreicht wurde. In diesem Versuch erfüllten die Bedingungen für die Messung der Ernährungsindizes die Voraussetzungen für eine optimale Interpretation der erhaltenen Werte nicht. Die Messungen hätten bei Futtererfolg müssen, das jünger und noch in der vollen Wachstumsphase gewonnen wurde, und vorzugsweise nur bei den Grä-

Tab. 5 | Auswirkungen der PK-Düngung auf den P- und K-Ernährungsindex (PNI bzw. KNI) in den Jahren 1997, 2001 und 2005 für eine zwei Mal jährlich gemähte Wiese im Jura. Für einen Index in einem bestimmten Jahr unterscheiden sich Werte mit einem gleichen nachfolgenden Buchstaben nicht signifikant voneinander.

Ernährungs- index	PNI*			KNI*		
	1997	2001	2005	1997	2001	2005
P/K-Düngung						
0/0	74 d	62 e	51 e	62 e	47 e	45 e
9/0	86 c	81 cd	77 c	66 de	50 e	44 e
9/29	90 bc	81 cd	77 cd	75 cd	56 d	58 d
9/58	85 c	79 d	72 d	93 b	63 c	75 b
17/29	99 a	89 b	90 ab	76 cd	56 d	56 d
17/58	101 a	90 b	87 b	85 bc	59 cd	65 c
17/87	94 ab	87 bc	87 b	95 b	71 b	80 ab
26/116	101 a	98 a	93 a	106 a	84 a	82 a
Durchschnitt	91	84	79	82	61	63
P-Wert	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
LSD	8	8	5	11	6	6

* Gewichtet mit dem Trockensubstanz-Ertrag der einzelnen Schnitte.

sern, wie dies Liebisch *et al.* (2013) für PNI vorschlugen. Immerhin war die Beeinflussung von PNI und KNI durch die Düngung mit P und K konsistent. Das Niveau des KNI war jedoch wahrscheinlich zu tief. 2001 und 2005 deuteten die allermeisten KNI-Werte auf eine K-Mangelversorgung hin, die aber nicht durch einen tiefen K-Gehalt des Bodens bestätigt wurde.

Schlussfolgerungen

Mit zunehmenden Gaben von P (0 bis 26 kg/ha/Jahr) und von K (0 bis 116 kg/ha/Jahr) steigt die Verfügbarkeit dieser Elemente im Boden. Mit den beiden Extraktionsmethoden (CO₂ und AA-EDTA) lassen sich die Unterschiede bei den Düngungsverfahren gut messen.

Die PK-Düngung hatte wenig Einfluss auf die botanische Zusammensetzung der Wiese, jedoch eine positive Wirkung auf die Menge des produzierten Futters, die sich im Laufe der Jahre verstärkte.

Sowohl P- als auch K-Gehalte des Futters steigen deutlich mit zunehmender PK-Düngung, bleiben aber unter den jeweiligen Referenzgehalten des «Grünen Buches» (Daccord *et al.* 2017).

Aufgrund der Entwicklung des P-Gehalts des Bodens, der botanischen Zusammensetzung, der Menge des produzierten Futters und dessen P-Gehalts, der Einfuhr/Ausfuhr-Bilanz sowie des P-Ernährungsindex PNI kann eine jährliche Gabe zwischen 9 und 17 kg P/ha/Jahr empfohlen werden. Dieser Wert entspricht ziemlich genau den Empfehlungen von Huguenin-Elie *et al.* (2017) für eine wenig intensive Wiese, die etwa 45 dt TS/ha/Jahr produziert.

Die Empfehlung der optimalen K-Dosis liegt dagegen je nach dem betrachteten Indikator zwischen 0 (K-Gehalt des Bodens) und 87 kg K/ha/Jahr (Bilanz und KNI). Gestützt auf die Futterproduktion (Menge und K-Gehalt) und in Übereinstimmung mit den Empfehlungen von Huguenin-Elie *et al.* (2017) scheint eine Dosis von 58 kg K/ha/Jahr angemessen. ■

Dank

Unser Dank gilt allen Personen, die zu einem guten Ablauf dieses Langzeitversuchs beigetragen haben, namentlich Cédric Bertola, Luc Stévenin und Jakob Troxler. Wir danken auch Lucie Büchi für die statistische Auswertung der Daten sowie Olivier Huguenin und Marco Meisser für die Verbesserungsvorschläge zu diesem Manuskript.

Literatur

- BLW, 2014. Weisungen nach Artikel 59 und Anhang 4 der Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (DZV). Extensiv genutzte Wiesen, wenig intensiv genutzte Wiesen und Streueflächen der Qualitätsstufe II, 15 S. Zugang: <http://www.bff-spb.ch/de/gesetzliche-grundlagen/gesetzliche-grundlagen-des-bundes/>
- Daccord R., Wyss U., Kessler J., Arrigo Y., Rouel M., Lehmann J., Jeangros B. & Meisser M., 2017. Nährwert des Raufutters. In: Fütterungsempfehlungen für Wiederkäuer (Grünes Buch), Kapitel 13, Hrsg. Agroscope, Posieux.
- Daget P. & Poissonet J., 1971. Une méthode d'analyse phytosociologique des prairies. *Ann. Agron.* **22** (1), 5–41.
- Duru M. & Théliier-Huché L., 1997. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In: Inra (Hrsg.), Diagnostic procedures for crop management. Les colloques de l'Inra, 125–138.
- Flisch R., Neuweiler R., Kuster T., Oberholzer H., Huguenin-Elie O. & Richner W., 2017. 2/Bodeneigenschaften und Bodenanalysen. In: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017) (Hrsg. W. Richner & S. Sinaj &). *Agrarforschung Schweiz* **8** (6), Spezialpublikation, 2/1–2/33.
- Huguenin-Elie O., Mosimann E., Schlegel P., Lüscher A., Kessler W. & Jeangros B., 2017. 9/Düngung von Grasland. In: Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017) (Hrsg. S. Sinaj & W. Richner). *Agrarforschung Schweiz* **8** (6), Spezialpublikation, 9/1–9/22.
- Jouany C., Bélanger G., Jeangros B., Morel C., Sinaj S., Stroia C. & Ziadi N., 2013. Evaluation of phosphorus nutrition index as a tool for p nutrition diagnosis in permanent grassland. In: 7th International Phosphorus Workshop. 9.9., Ed. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 1–1.
- Liebisch F., Bünemann E. K., Huguenin-Elie O., Jeangros B., Frossard E. & Oberson A., 2013. Plant phosphorus nutrition indicators evaluated in agricultural grasslands managed at different intensities. *Eur. J. Agron.* **44**, 67–77.
- Messiga A., Ziadi N., Jouany C., Virkajärvi P., Suomela R., Sinaj S., Bélanger G., Stroia C. & Morel C., 2015. Soil test phosphorus and cumulative phosphorus budgets in fertilized grassland. *Ambio.* **44** (2), 252–262.
- Philipp A., Huguenin-Elie O., Flisch R., Gago R., Stutz C., Kessler W. & Sinaj S., 2004. Einfluss der Phosphordüngung auf eine Fromentalwiese. *Agrarforsch.* **11** (3), 86–91.
- R Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Zugang: <http://www.R-project.org/>
- Richner W. & Sinaj S., 2017. Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). *Agrarforschung Schweiz* **8** (6), Spezialpublikation, 276 S.
- Schlegel P., Wyss U., Arrigo Y & Hess H. D., 2016. Mineral concentrations of fresh herbage from mixed grassland as influenced by botanical composition, harvest time and growth stage. *Animal Feed Science Technology* **219**, 226–233.
- Schreiber K.-F., 1977. Wärmegliederung der Schweiz auf Grund von phänologischen Geländeaufnahmen in den Jahren 1969–1973. Hrsg. Eidg. Justiz- und Polizeidepartement, der Delegierte für Raumplanung 69 S. + 5 Karten 1:200000.
- Thomet P. & Koch B., 1993. Längerfristige Auswirkung von Düngung und Schnittregime auf eine Heumatte. *Landwirtschaft Schweiz* **6** (2), 107–114.

Riassunto**Fabbisogno di fosforo e potassio di un prato da sfalcio del Giura ricco di festuca rossa**

Con aggiunte equilibrate di fosforo (P) e di potassio (K) nei prati è possibile mantenere un'adeguata composizione botanica al fine di produrre una quantità sufficiente di foraggio senza danneggiare l'ambiente. Otto metodi di fertilizzazione con diversi tenori di P e K sono stati applicati per 13 anni su un prato permanente del Giura utilizzato in modo poco intensivo. Un apporto crescente di P (tra 0 e 26 kg P/ha/anno) e K (tra 0 e 116 kg K/ha/anno) ha permesso di migliorare la disponibilità di questi elementi nel suolo. La fertilizzazione con P e K ha influenzato in modo ridotto la composizione botanica, ma ha avuto un effetto significativo e positivo sulla produzione di foraggio a partire dal 10° anno. I tenori di P e di K nel foraggio sono aumentati nettamente con l'incremento degli apporti di questi due elementi. Sulla base del tenore di P del suolo, della composizione botanica, della quantità di foraggio e del suo tenore di P, del bilancio apporti-aspporti e dell'indice nutrizionale PNI, un'aggiunta annua tra 9 e 17 kg di P/ha/anno può essere considerata ottimale per questo tipo di prati che producono circa 45 dt MS/ha/anno. Il quantitativo ottimale di K è più difficile da determinare perché varia notevolmente a seconda dell'indicatore preso in considerazione.

Summary**Phosphorus and potassium requirements of a hay meadow of the Swiss Jura dominated by red fescue**

Phosphorus (P) and potassium (K) inputs on grassland aim to maintain an appropriate botanical composition and to produce sufficient quantities of forage without harming the environment. Over a 13-year period, eight different levels of P and K fertilisation were applied on a low-intensive permanent grassland in the Swiss Jura. Rising inputs of P (between 0 and 26 kg P/ha/year) and K (between 0 and 116 kg K/ha/year) improved the availability of these elements in the soil. PK fertilisation had little influence on the botanical composition, but a significant and positive effect on the quantity of forage from the tenth year onwards. P and K content of the forage increased substantially with increasing inputs of these two elements. Based on the soil P content, the botanical composition, the quantity of forage and its P content, the annual P balance (inputs-removal) and the P nutrition index (PNI), an annual input between 9 and 17 kg P/ha/year can be considered as optimal for this type of grassland producing around 45 dt DM/ha/year. The optimal dose of K is more difficult to determine, since it varies significantly depending on the indicator considered.

Key words: Swiss mountain meadow, fertilization, soil fertility, botanical composition, forage, nutrition index.